

**В. Л. КАЛЮЖНИЙ, О. С. ЯРМОЛЕНКО**

### **ЗУСИЛЛЯ ДЕФОРМУВАННЯ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І ТЕМПЕРАТУРНИЙ РОЗПОДІЛ У ЗДЕФОРМОВАНИЙ ЗАГОТОВЦІ ПРИ ГАРЯЧОМУ ЗВОРОТНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ ІЗ ЛАТУНІ**

Методом скінченних елементів створена математична модель та проведений аналіз гарячого видавлювання із латуні вісесиметричного порожнистого виробу з виступами у донній частині та необхідним пропрацюванням структури металу у місці переходу стінки у донну частину. Використана схема зворотного видавлювання з роздачою в рухомій матриці, в якій діаметр вихідної заготовки менший від зовнішнього розміру виробу, а формоутворення виробу проходить при зменшеному зусиллі. Застосована пластикна модель металу. Виявлена форма пуансона і матриці, що забезпечили необхідне пропрацювання zdeформованого металу у потрібному місці. Визначені кінцеві форма і розміри виробу. Встановлена залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона та точний розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях заготовки з деформуючим інструментом для проектування штампового оснащення, а також установлений напружено-деформований стан у zdeформованій заготовці при максимальному зусиллі видавлювання. Показані послідовність формоутворення виробу та зміна температурного розподілу на протязі процесу видавлювання. Приведені розподіли компонент напружень та деформацій по об'єму заготовки. Оцінка пропрацювання структури металу пластичною деформацією проводилася по розподілу інтенсивності деформацій.

**Ключові слова:** гаряче видавлювання; порожнистий виріб; метод скінченних елементів; зусилля видавлювання; напруження; деформації; температурний розподіл.

**В. Л. КАЛЮЖНИЙ, А. С. ЯРМОЛЕНКО**

### **УСИЛИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В СДЕФОРМИРОВАННОЙ ЗАГОТОВКЕ ПРИ ГОРЯЧЕМ ОБРАТНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛАТУНИ**

Методом конечных элементов создана математическая модель и проведен анализ горячего выдавливания из латуни осесимметричного полого изделия с выступлениями в донной части и необходимой проработкой структуры металла в месте перехода стенки в донную часть. Использована схема обратного выдавливания с раздачей в подвижной матрицы, в которой диаметр исходной заготовки меньше внешнего размера изделия, а формообразование изделия проходит при уменьшенном усилии. Применена пластическая модель металла. Выведена форма пуансона и матрицы, которые обеспечили необходимую проработку сдеформированного металла в нужном месте. Определены конечные форма и размеры изделия. Установлена зависимость усилия выдавливания от перемещения пуансона и точное распределение удельных усилий на контактирующих поверхностях заготовки с деформирующим инструментом для проектирования штамповой оснастки, а также установлено напряженно-деформированное состояние в деформированной заготовке при максимальном усилии выдавливания. Показаны последовательность формообразования изделия и изменение температурного распределения в течение процесса выдавливания. Приведены распределения компонент напряжений и деформаций по объему заготовки. Оценка проработки структуры металла пластической деформацией проводилась по распределению интенсивности деформаций.

**Ключевые слова:** горячее выдавливание; полая изделие; метод конечных элементов; усилие выдавливания; напряжения; деформации; температурное распределение.

**V. KALIUZHNYI, O. YARMOLENKO**

### **DEFORMATION FORCES, STRESS-DEFORMED STATE AND TEMPERATURE DISTRIBUTION IN DEFORMED BILLET DURING HOT REVERSE EXTRUSION OF HOLLOW PRODUCTS FROM BRASS**

A finite element method was used to create a mathematical model and analyze hot extrusion of an axisymmetric hollow product from brass with performances in the bottom part and the necessary study of the metal structure at the place of wall transition to the bottom part. The used scheme of reverse extrusion with distribution into a movable matrix, in which the diameter of the initial billet is smaller than the external size of the product, and the shaping of the product takes place with a reduced effort. Applied plastic metal model. The identified shape of the punch and the matrix provided the necessary study in the right place. The final shape and dimensions of the product were determined. The dependence of the extrusion force on the movement of the punch and the exact distribution of the specific forces on the contacting surfaces of the workpiece with a deforming tool for designing die tooling is established, and the stress-strain state in the deformed workpiece is set at the maximum extrusion force. The sequence of product formation and the change in temperature distribution during the extrusion process are shown. The distributions of components of stresses and strains in the volume of the workpiece are given. Evaluation of the study of the metal structure by plastic deformation was carried out according to the distribution of the intensity of deformations.

**Keywords:** hot extrusion; hollow product; finite element methods; extrusion force; stress; strain; temperature distribution.

**Вступ.** В теперішній час для виготовлення виробів з підвищеною надійністю і довговічністю процесами гарячого об'ємного штампування вирішують задачі по виконанню необхідного опрацювання структури металу пластичною деформацією по всьому об'єму виробу або в окремих його частинах. Методи і термомеханічні параметри кування на молотах і гарячого штампування на пресах виробів з кольорових металів і сплавів розглянуті в роботі [1]. Приведені елементи конструювання

поковок і деформуючого інструменту. Основна увага приділена отриманню необхідної форми виробів. У роботі [2] дані рекомендації і наведені приклади проектування технологічних процесів і штампового оснащення для гарячого об'ємного штампування виробів на різному ковальсько-пресовому обладнанні. Також викладені особливості гарячого об'ємного штампування деталей різної форми з кольорових сплавів. У приведених джерелах усі відомості базуються на підставі експериментальних даних і

виробничого досвіду, і основна увага приділена досягненню гарячим формоутворенням необхідної форми виробів. Для удосконалення існуючих і розробки нових технологічних процесів і гарячого об'ємного штампування використовують комп'ютерне моделювання з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Моделювання дозволяє встановлювати технологічні параметри і визначати дані для проектування штампового оснащення, які не вимагають доопрацювання експериментальними роботами [3, 4]. У роботах [5–7] за допомогою МКЕ проведені розрахункові дослідження процесів гарячого кування та штампування деталей необхідної форми. Можливості отримання куванням і гарячим штампуванням відповідальних виробів із сталей з заданим пропрацюванням структури металу пластичною деформацією та досягненням необхідного розподілу деформацій по об'єму виробів приведені в джерелах [8–10]. Авторами цих робіт показано, що пропрацювання структури можна оцінити по кінцевому розподілу інтенсивності деформацій в здеформованих заготовках. Актуальними питанням при гарячому штампуванні, зокрема при деформуванні видавлюванням, є зниження зусилля формоутворення виробів. Це забезпечить використання пресового обладнання зменшеного зусилля та підвищення стійкості деформуючого інструмента, що в підсумку приводить до зниження собівартості виробів. Такий ефект можна отримати завдяки використанню схеми зворотного видавлювання з роздачою [11]. В роботі встановлено зменшення зусилля видавлювання на 10% в порівнянні з традиційним зворотним видавлюванням в нерухомій матриці.

**Мета роботи.** Метою роботи є встановлення за допомогою метода скінченних елементів параметрів гарячого видавлювання в рухомій матриці вісесиметричного порожнистого виробу з виступами на донній частині із забезпеченням потрібного пропрацювання структури металу в місці переходу стінки у донну частину.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 зображена схема зворотного видавлювання з роздачою у рухомій матриці порожнистого виробу з виступом в донній частині зі сторони порожнини [11]. Ліворуч від вісі симетрії зображений вихідний стан, праворуч – в процесі видавлювання. Вихідну заготовку 1 встановлюють в рухомій матриці 2 на виштовхувачі 3. Деформування заготовки 1 виконують за допомогою пуансона 4. При видавлюванні матрицю 2 опускають вниз із однаковою швидкістю  $V_0$  з пуансоном 4. Після видавлювання отримують виріб 5, у якого зовнішній діаметр  $D$  більший чим діаметр  $D_0$  вихідної заготовки 1.

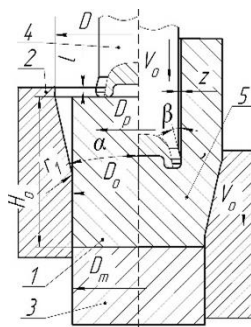


Рис. 1 – Схема видавлювання в рухомій матриці

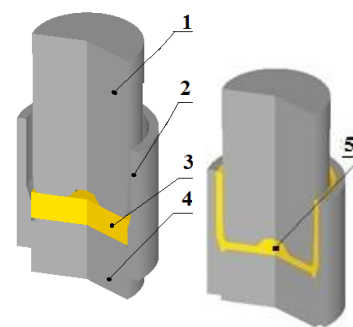


Рис. 2 – Розрахункові схеми в розрізі: а – схема на початку видавлювання, б – схема в кінці видавлювання

Розрахунок параметрів проводили шляхом моделювання з використанням скінченно-елементної програми DEFORM. Для видавлювання використали циліндричну заготовку із латуні DIN-Cu-Zn28 діаметром  $D_0=210$  мм і висотою  $H_0=52$  мм з коефіцієнтом тертя  $\mu=0,2$  та швидкістю деформування  $V_0=40$  мм/сек. Температура вихідної заготовки  $850^\circ\text{C}$ . Температурний інтервал гарячого видавлювання для такого матеріалу складає  $670\text{--}850^\circ\text{C}$ . Для забезпечення такого температурного інтервалу на протязі видавлювання необхідний підігрів деформуючого інструменту до  $200^\circ\text{C}$ . Використана пластична модель металу та циліндричні координати. Для створення потрібної макроструктури металу у місці переходу стінки у донну частину необхідно забезпечити інтенсивність деформацій  $\epsilon \geq 1,5$ . Розрахункові схеми в розрізі наведені на рис. 2. На рис. 2а показана схема на початку видавлювання. Пуансон 1 встановлений в матриці 2 на заготовці 3, яка розміщена на виштовхувачі 4. При одночасному опусканні пуансона 4 і матриці 2 отримується виріб 5.

**Обговорення результатів.** Результати моделювання приведені для розмірів бакової поверхні пуансона і розмірів матриці, які забезпечили задану інтенсивність деформацій у місці переходу стінки в донну частину виробу. На рис. 2 приведена залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона. Зусилля на пуансоні постійно зростає і в кінці процесу видавлювання досягає величини 0,74 МН. Питомі зусилля на деформуючому інструменті можна оцінити по величині нормальних напружень  $\sigma_n$ , які виникають на контактуючих поверхнях між здеформованою заготовкою та деформуючим інструментом при максимальному значенні зусилля видавлювання. Розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті з формою і розмірами половини здеформованої заготовки показані на рис. 4. Тут і в подальшому тонкими лініями зображений деформуючий інструмент, а розміри по вісях наведені в міліметрах.

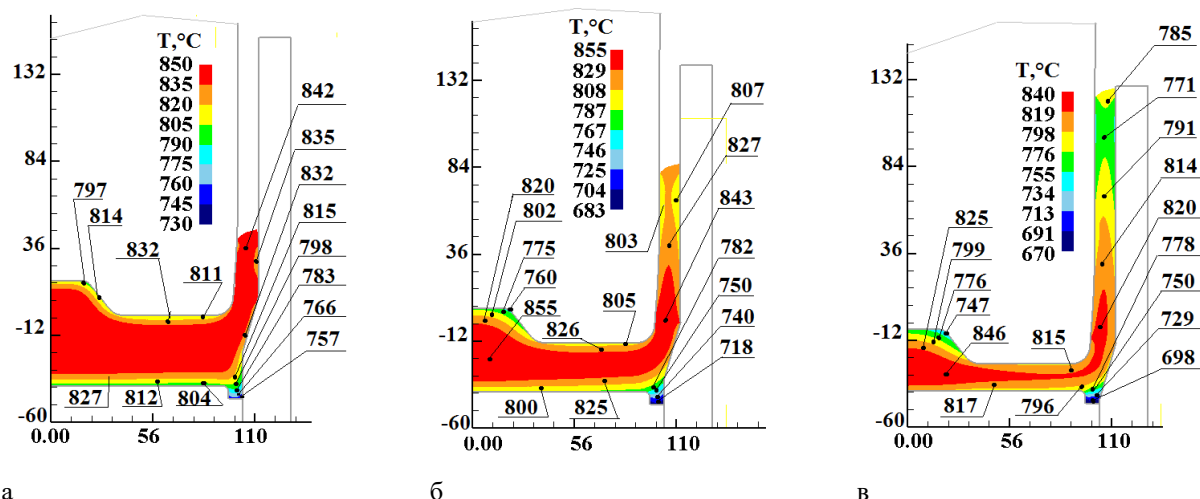


Рис. 3 – Послідовність формоутворення виробу з розподілом температури у zdeформованій заготовці:

а – при переміщенні пуансона 15 мм, б – при переміщенні пуансона 27 мм, в – при переміщенні пуансона 39 мм

Найбільші величини напружень  $\sigma_n$  виникають на поверхнях пуансона та виштовхувача. На пуансоні вони знаходяться у межах  $\sigma_n=139\div 273$  МПа, а на поверхні виштовхувача отримано  $\sigma_n=268\div 299$  МПа. На матриці максимальні значення цих напружень  $\sigma_n=140$  МПа виникають на конусній поверхні. Вказані величини питомих зусиль дозволяють вибрати матеріал для пуансона і виштовхувача, а також використати однокандаловану матрицю. Після видавлювання забезпечуються необхідні форма і розміри виробу. На торці стінки виробу утворюється утяжина висотою 9 мм.

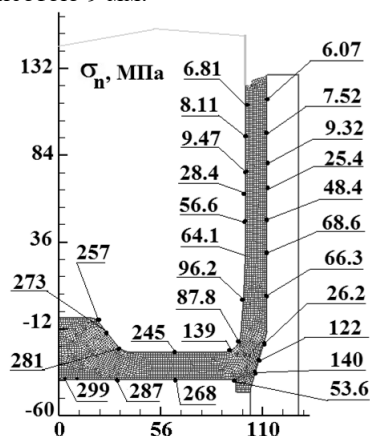


Рис. 4 – Розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях

На рис. 5 приведена послідовність формоутворення виробу з розподілом температури у zdeформованій заготовці. На рис. 5, а зображена zdeформована заготовка при переміщенні пуансона 15 мм. Відбулося заповнення металом впадин на пуансоні та виштовхувачі і починається течія металу у стінку. Практично по всьому об'єму заготовки температура знизилася до величини  $T=842^\circ\text{C}$ . В деяких областях заготовки поблизу контактуючих поверхонь

температура зменшується до  $T=797\div 811^\circ\text{C}$ . Zдеформована заготовка при переміщенні пуансона 27 мм показана на рис. 5, б. На цій стадії проходить подальше заповнення стінки виробу. Також має місце подальше зниження температури zdeформованого металу в стінці до  $T=807\div 843^\circ\text{C}$  та в областях поблизу контактуючих поверхонь до  $T=775\div 805^\circ\text{C}$ . Розподіл температури у zdeформованому металі в кінці видавлювання приведений на рис. 5, в. В осередку деформації у донній частині zdeформованої заготовки температура знижується до  $T=815\div 830^\circ\text{C}$ , а по висоті стінки температура знаходиться у межах  $T=771\div 820^\circ\text{C}$ . Таким чином, температурний інтервал гарячого штампування дотримується.

Розподіли компонент напружень при максимальній величині зусилля видавлювання зображені на рис. 6. Радіальні напруження  $\sigma_r$  по всій заготовці стискаючі. У стінці zdeформованої заготовки вони знаходяться у межах  $\sigma_r=-10\div -140$  МПа. У донній частині в області виступу зі сторони порожнини отримано  $\sigma_r=-200\div -2500$  МПа. В місці переходу стінки у донну частину  $\sigma_r=-140$  МПа. Осьові напруження  $\sigma_z$  практично по всьому об'єму zdeформованої заготовки також стискаючі. У стінці ці напруження досягають значень у межах  $\sigma_z=-60\div -100$  МПа. В області переходу стінки у донну частину заготовки отримано  $\sigma_z=-100$  МПа. В донній частині осьові напруження приймають значення у межах  $\sigma_z=-170\div -290$  МПа. Розподіл тангенціальних напружень  $\sigma_\theta$  (рис. 6, в) практично однаковий із розподілом радіальних напружень  $\sigma_r$ . Розподіл інтенсивності напружень зображений на рис. 6, г. Найбільші значення цих напружень отримані у донній частині zdeформованої заготовки.

На рис. 7 приведені розподіли компонент кінцевих деформацій по об'єму половини заготовки. По стінці радіальні деформації стискаючі та змінюються від  $\varepsilon_r=-0,3$  в області торця до  $\varepsilon_r=-1,7$  в

області переходу у донну частину (рис. 7а). У донній частині ці деформації розтягувальні та знаходяться в межах  $\varepsilon_\rho = 0,5 \div 1,0$ . Розподіл осевих деформацій  $\varepsilon_z$  показаний на рис. 7, б. У стінці отримані розтягувальні деформації, які досягають величини  $\varepsilon_z = 0,83 \div 1,3$ . Також розтягувальні деформації  $\varepsilon_z = 0,31$  виникають у виступі донної частини. По самій донній частині виникають стискаючі деформації

у межах  $\varepsilon_z = -1,0 \div -1,4$ . Крім виступу у донній частині, по всьому об'єму здеформованої заготовки виникають розтягувальні тангенціальні деформації  $\varepsilon_\theta$  (рис. 7, в). В області торця стінки отримано  $\varepsilon_\theta = 0,12$  з подальшим зростанням до  $\varepsilon_\theta = 0,6$  у місці переходу стінки у донну частину, в якій вони збільшуються до величини  $\varepsilon_\theta = 0,8$ .

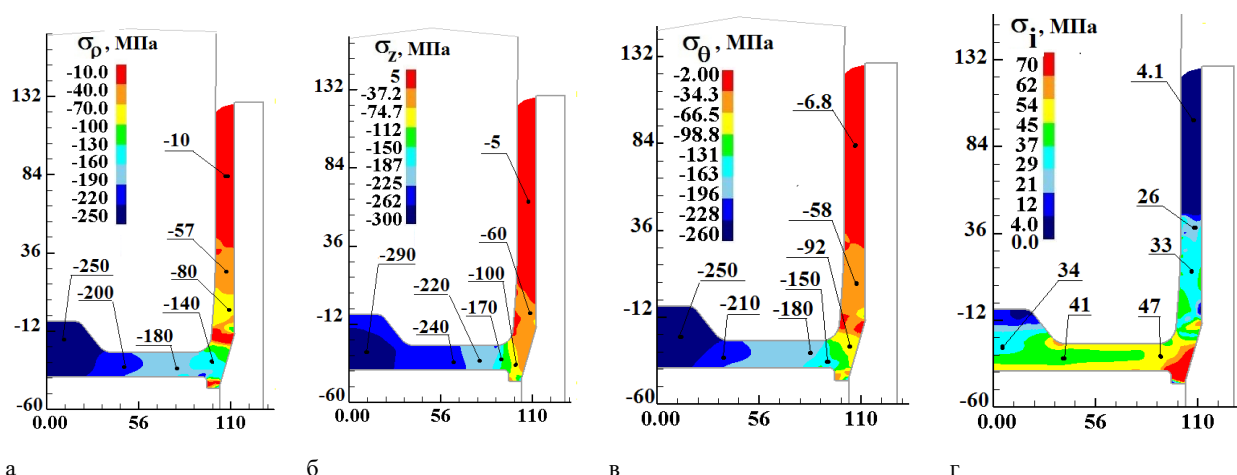


Рис. 6 – Розподіли радіальних  $\sigma_\rho$ , осевих  $\sigma_z$ , тангенціальних  $\sigma_\theta$  напружень та інтенсивності напружень  $\sigma_i$  по об'єму здеформованої заготовки: а – розподіл  $\sigma_\rho$ , б – розподіл  $\sigma_z$ , в – розподіл  $\sigma_\theta$ , г – розподіл  $\sigma_i$

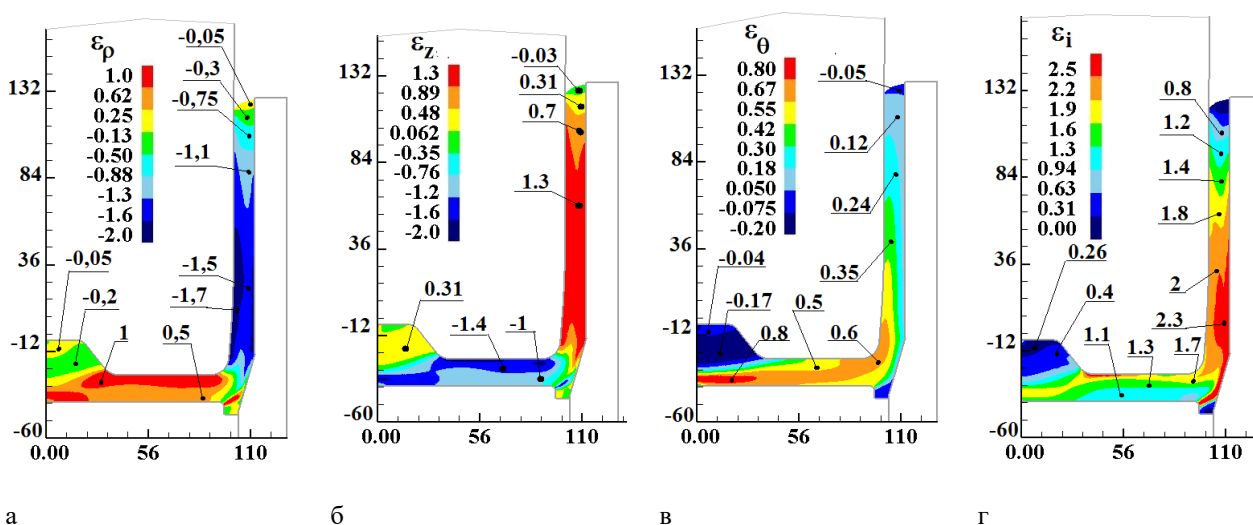


Рис. 7 – Розподіли радіальних  $\varepsilon_\rho$ , осевих  $\varepsilon_z$ , тангенціальних  $\varepsilon_\theta$  деформацій та інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  по об'єму здеформованої заготовки: а – розподіл  $\varepsilon_\rho$ , б – розподіл  $\varepsilon_z$ , в – розподіл  $\varepsilon_\theta$ , г – розподіл  $\varepsilon_i$

Найбільше пропрацювання структури металу пластичною деформацією постерігається по висоті стінки здеформованої заготовки, що видно з розподілу інтенсивності деформацій (рис. 7г). В області торця стінки отримано  $\varepsilon_i = 0,8$  з подальшим зростанням до величин в межах  $\varepsilon_i = 1,7 \div 2,3$  в області переходу стінки у донну частину здеформованої заготовки, що необхідно для створення потрібної макроструктури у цьому місці.

Таким чином, в результаті комп'ютерного моделювання отримані всі необхідні дані для

проектування технології гарячого видавлювання: залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона – для визначення роботи деформації та вибору пресового обладнання; розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті – для проектування штампового оснащення; розподіл інтенсивності деформацій – для оцінки якості виробу.

**Висновки.** Методом скінченних елементів виконане моделювання гарячого видавлювання із лагуні вісесиметричного порожнистого виробу з виступами на донній частині. Розраховані форма

пуансона і матриці, які забезпечили потрібне пропрацювання структури металу пластичною деформацією в області переходу стінки у донну частину виробу. Визначені зусилля видавлювання, розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті та кінцева форма і розміри виробу. Установлена зміна температури здеформованого металу на протязі видавлювання.

Приведені розподіли компонент напружень та кінцевих деформацій по об'єму здеформованої заготовки.

#### Список літератури

1. Корнеев Н.И. Ковка и штамповка цветных металлов. Справочник / Н.И. Корнеев, Аржаков В.Н., Бармашенко Б.Г. и др. – М: Машиностроение, 1971. – 232 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т.3 // ред. совет: Е.И. Семенов (предс.), Ганаго О.А., Живов Л.И. и др. – М.: Машиностроение, 1986, т.2. Горячая объемная штамповка / Под ред. Е.И. Семенова. 1986. – 592 с.
3. Данченко В.Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, А.Н. Головкин. – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. – 448 с.
4. Данченко В.Н. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко и др. – Днепропетровск: Системные технологии, 2008. – 448 с.
5. Снитко С.А. Конечно-элементное моделирование многопереходного формоизменения при производстве железнодорожных колес / С.А. Снитко, В.Л. Калюжный, // Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение. – К: НТУУ «КПИ», 2011, №11. – С. 106–112.
6. Алиев И.С. Влияние операции выворота поковки коническими плитками на распределение деформаций / И.С. Алиев, О.Е. Марков, Я.Г. Жбанков и др. // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2010. №3(24). – С. 64–69.
7. Калюжный В.Л. Конечно-элементное моделирование многопереходного процесса деформирования заготовок при производстве железнодорожных колес / В.Л. Калюжный, А.С. Снитко // Вісник НТУУ „КПІ”. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, серія Машинобудування, 2011. № 62. – С. 106–112.
8. Алиев И. С. Управление напряженно-деформированным состоянием заготовки в процессахковки крупных поковок / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган и др. // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2013. №1(34). – С. 50–59.
9. Марков О.Е. Современные способы получения тонкостенных днищ ответственного назначения / О.Е. Марков, А.О. Шарун, М.С. Косилов и др. // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2017. №1(44). – С. 115–123.
10. Калюжный В.Л. Горячая штамповка полых изделий из высокопрочного алюминиевого сплава с заданной проработкой структуры металла пластической деформацией / В.Л. Калюжный, В.Н. Горностай, А.А. Гулюк // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. –

Краматорск: ДГМА, 2017. – № 1(44). – С. 137–143.

11. Калюжный В.Л. Анализ схем холодного выдавливания висесимметричных порожнистых виробів / В.Л. Калюжный, А.М. Потятиник // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Луцьк: НТУ, 2017. – № 59. – С. 137–143.

#### Bibliography (transliterated)

1. Korneev N.Y. Kovka y shtampovka tsvetnykh metallov. Spravochnik / N.Y. Korneev, Arzhakov V.N., Barmashenko B.H. y dr. – Moscow: Mashynostroenye, 1971. – 232 p.
2. Kovka y shtampovka: Spravochnik. V 4 t. // red. sovet: E.Y. Semenov (preds.), Hanago O.A., Zhyvov L.Y. y dr. – Moscow.: Mashynostroenye, 1986, vol.2. Horiachaia obymnaia shtampovka / Pod red. E.Y. Semanova. 1986. – 592 p.
3. Danchenko V.N. Proyzvodstvo profilei yz aliumynnyevykh splavov / V.N. Danchenko, A.A. Mylenyn, A.N. Holovko. – Dnepropetrovsk: Systemnye tekhnolohyy, 2002. – 448 p.
4. Danchenko V.N. Kompiuternoe modelirovaniye protsessov obrabotky metallov davleniyem. Chyslennyye metody. / V.N. Danchenko, A.A. Mylenyn, V.Y. Kuzmenko y dr. – Dnepropetrovsk: Systemnye tekhnolohyy, 2008. – 448 p.
5. Snytko S.A. Konechno-ementnoe modelirovaniye mnohoperekhodnoho formoyzmeneniya pry proyzvodstve zheleznodorozhnykh koles / S.A. Snytko, V.L. Kaliuzhnyi, // Vestnyk NTUU «KPY», Mashynostroenye. – Kiev: NTUU «KPY», 2011, No11. – P. 106–112.
6. Alyev Y.S. Vliyaniye operatsyy vyvoroata pokovky konicheskymy plytamy na raspredeleniye deformatsiy / Y.S. Alyev, O.E. Markov, Ya.H. Zhbakov y dr. // Obrabotka materyalov davleniyem. – Kramatorsk: DHMA, 2010. No(24). – P. 64–69.
7. Kaliuzhnyi V.L. Konechno-ementnoe modelirovaniye mnohoperekhodnoho protsessa deformirovaniya zahotvok pry proyzvodstve zheleznodorozhnykh koles / V.L. Kaliuzhnyi, A.S. Snytko // Visnyk NTUU „KPY”, Mashynobuduvannia. – Kiev: «KPY», 2011. No 62. – P. 106–112.
8. Alyev Y. S. Upravleniye napriazhenno-deformirovannym sostoianiem zahotvki v protsessakh kovky krupnykh pokovok / Y.S. Alyev, Ya.H. Zhbakov, L.V. Tahan y dr. // Obrabotka materyalov davleniyem. – Kramatorsk: DHMA, 2013. No(34). – P. 50–59.
9. Markov O.E. Sovremennyye sposoby polucheniya tonkostennykh dnyshch otvetstvennogo naznacheniya / O.E. Markov, A.O. Sharun, M.S. Kosylov y dr. // Obrabotka materyalov davleniyem. – Kramatorsk: DHMA, 2017. No1(44). – P. 115–123.
10. Kaliuzhnyi V.L. Horiachaia shtampovka polykh yzdelyi yz vysokoprochnoho aliumynnyevoho splava s zadannoi prarabotkoi struktury metalla plastycheskoi deformatsiei / V.L. Kaliuzhnyi, V.N. Hornosta i, A.A. Huliuk // Obrabotka materyalov davleniyem. Sbornyk nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DHMA, 2017. –No 1(44). – P. 137–143.
11. Kaliuzhnyi V.L. Analiz skhem kholodnoho vydavliuvannia visesymetrychnykh porozhnistykh vyrobiv / V.L. Kaliuzhnyi, A.M. Potiatynik // Naukovі notatky. Mizhvuzivskyi zbiryk. – Luts'k: NTU, 2017. – No 59. – P. 137–143

Надійшла (received) 28.10.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Калюжний Володимир Леонідович (Калюжный Владимир Леонидович, Vladimir Kaljuzhnyi)** – доктор технічних наук, професор. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; e-mail: kwl\_2011@ukr.net.

**Ярмоленко Олександр Сергійович (Ярмоленко Александр Сергеевич, Yarmolenko Oleksandr Sergiiovych)** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент; email: olesboxme@gmail.com